



(19)

(11) Publication number: 2002059384 A

Generated Document.

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(21) Application number: 2000251483

(51) Intl. Cl.: B25J 13/00 B25J 5/00 B25J 9/22 G06N 3/00

(22) Application date: 22.08.00

(30) Priority:

(43) Date of application publication: 26.02.02

(84) Designated contracting states:

(71) Applicant: SONY CORP

(72) Inventor: OHASHI TAKESHI  
SABE KOTARO  
ITO MASATO  
YOKONO JUN

(74) Representative:

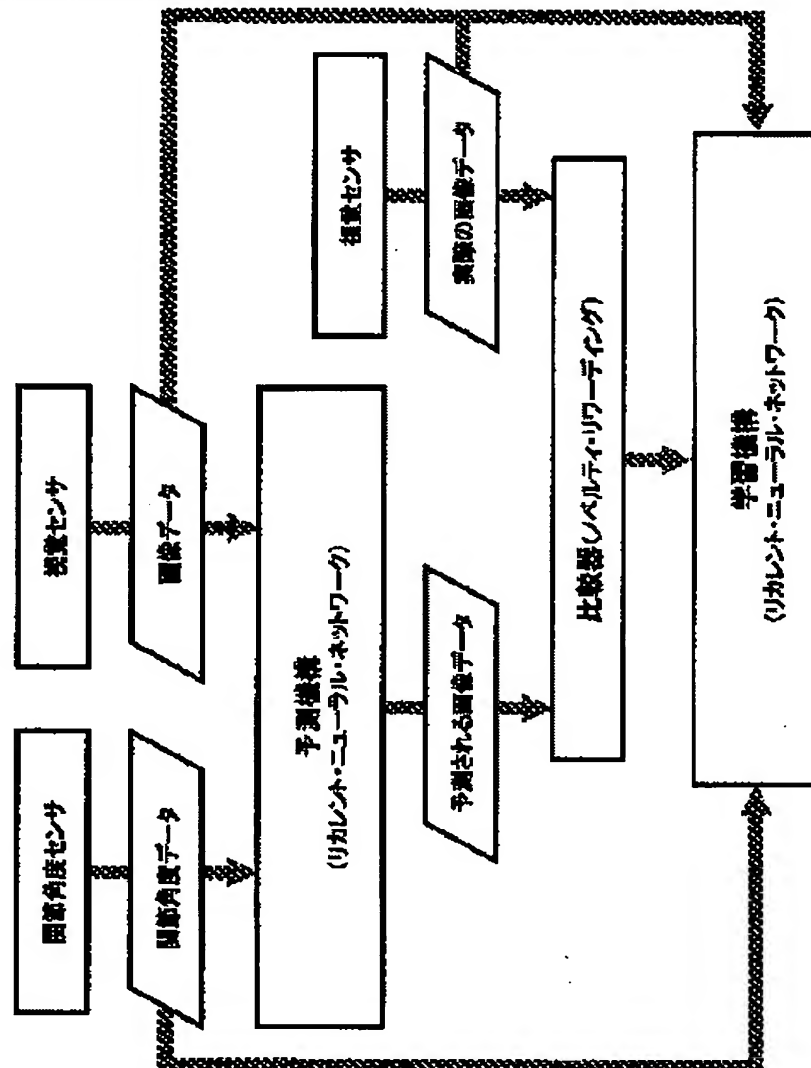
## (54) LEARNING SYSTEM AND LEARNING METHOD FOR ROBOT

(57) Abstract:

**PROBLEM TO BE SOLVED:** To make an autonomous robot moving by obtaining three-dimensional information learn a method for moving an object by sensing the influence of its operation on the object in a work environment.

**SOLUTION:** This robot is provided with a perception sensor including a camera, and a recurrent neural network as a learning mechanism. The robot moves a movable object in the external world by a controllable part of the robot, and senses an environment of the object and the movement of the object by the perception sensor, to learn a correlation between a method for moving respective revolute joint parts of the robot to the movement of the object. By estimating the movement of the object, the robot learns motion for moving the object by novelty rewarding.

COPYRIGHT: (C)2002,JPO



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2002-59384

(P2002-59384A)

(43) 公開日 平成14年2月26日 (2002. 2. 26)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テ-マコ-ド <sup>*</sup> (参考)
B 2 5 J 13/00		B 2 5 J 13/00	Z 3 F 0 5 9
5/00		5/00	C 3 F 0 6 0
9/22		9/22	A
G 0 6 N 3/00	5 5 0	G 0 6 N 3/00	5 5 0 E

審査請求 未請求 請求項の数14 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号 特願2000-251483 (P2000-251483)

(22) 出願日 平成12年8月22日 (2000. 8. 22)

(71) 出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(72) 発明者 大橋 武史

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ

ー株式会社内

(72) 発明者 佐部 浩太郎

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ

ー株式会社内

(74) 代理人 100101801

弁理士 山田 英治 (外2名)

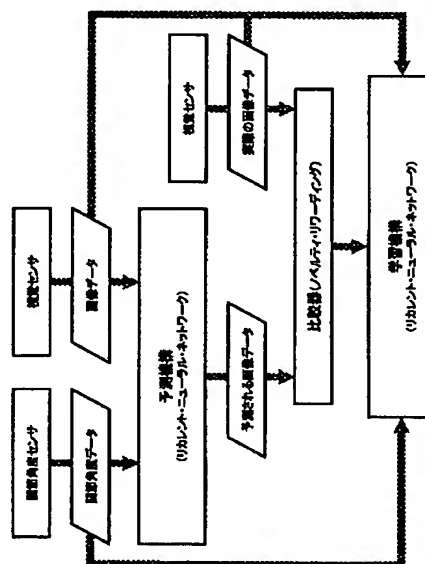
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 ロボットのための学習システム及び学習方法

(57) 【要約】

【課題】 3次元情報を得て移動する自律型移動ロボットが自己の動作が作業環境内にある対象物に及ぼす影響を感知して、対象物の動かし方を自己学習する。

【解決手段】 ロボットは、カメラを始めとする知覚センサと、学習機構としてのリカレント・ニューラル・ネットワークを備える。ロボット自身の持つ制御可能な部分によって外界の移動可能な対象物を動かし、知覚センサによって対称物のおかれている環境と、対象物の動きを知覚して、ロボットの各関節部の動かし方と対象物の動きのとの関連を学習する。また、対象物の動きを予測して、ノベルティ・リワーディングにより対象物を動かすモーションを自己学習する。



【特許請求の範囲】

【請求項1】複数の関節で構成されるロボットのための学習システムであって、作業空間上の対象物を動かすように各関節を駆動してロボットの動作を制御する制御手段と、作業環境上で発生する事象を検出する知覚手段と、前記制御手段により発現されるロボットの動作と該動作時の対象物の動き方と前記知覚手段により知覚した事象をリカレント・ニューラル・ネットワークに学習する学習手段と、を具備することを特徴とするロボットのための学習システム。

【請求項2】前記学習手段は、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた予測部と、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた学習部を備え、前記予測部は前記制御手段により発現される動作と前記知覚手段により知覚される事象を基に次の時刻の事象を予測し、前記学習部は、該予測した事象が前記知覚手段において次の時刻に現実知覚された事象と相違するときに、ロボットの動作と知覚される事象を学習する、ことを特徴とする請求項1に記載のロボットのための学習システム。

【請求項3】前記学習手段は、対象物の動かし方に対する経験をまったく持たない状態の学習フェーズと、ロボットの動作と対象物の動きに関する1又はそれ以上の関係を学習している状態の新規性探索フェーズとを有することを特徴とする請求項1に記載のロボットのための学習システム。

【請求項4】前記学習フェーズでは、対象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習することを特徴とする請求項3に記載のロボットのための学習システム。

【請求項5】ロボットの動作を所定回数だけ試行しても対象物の動き方に再現性を確認できなかった場合には、ロボットの初期位置と動作の組み合わせを変えて再試行することを特徴とする請求項4に記載のロボットのための学習システム。

【請求項6】前記新規性探索フェーズでは、ロボットの初期位置と動作に対する対象物の動き方を予測し、該予測した対象物の動き方が前記知覚手段により知覚された対象物の動き方と相違する場合に、新規性を認めて、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習することを特徴とする請求項3に記載のロボットのための学習システム。

【請求項7】新規性が認められた場合には、対象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方

を学習することを特徴とする請求項6に記載のロボットのための学習システム。

【請求項8】複数の関節で構成されるロボットのための学習方法であって、作業空間上の対象物を動かすように各関節を駆動してロボットの動作を制御する制御ステップと、作業環境上で発生する事象を検出する知覚ステップと、前記制御ステップにより発現されるロボットの動作と該動作時の対象物の動き方と前記知覚ステップにより知覚した事象をリカレント・ニューラル・ネットワークに学習する学習ステップと、を具備することを特徴とするロボットのための学習方法。

【請求項9】前記学習ステップでは、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた予測サブステップと、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた学習サブステップを備え、前記予測サブステップでは前記制御ステップにより発現される動作と前記知覚ステップにより知覚される事象を基に次の時刻の事象を予測し、

前記学習サブステップでは、該予測した事象が前記知覚ステップにおいて次の時刻に現実知覚された事象と相違するときに、ロボットの動作と知覚される事象を学習する、ことを特徴とする請求項8に記載のロボットのための学習方法。

【請求項10】前記学習ステップは、対象物の動かし方に対する経験をまったく持たない状態の学習フェーズと、ロボットの動作と対象物の動きに関する1又はそれ以上の関係を学習している状態の新規性探索フェーズとを有することを特徴とする請求項8に記載のロボットのための学習方法。

【請求項11】前記学習フェーズでは、対象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習することを特徴とする請求項10に記載のロボットのための学習方法。

【請求項12】ロボットの動作を所定回数だけ試行しても対象物の動き方に再現性を確認できなかった場合には、ロボットの初期位置と動作の組み合わせを変えて再試行することを特徴とする請求項11に記載のロボットのための学習方法。

【請求項13】前記新規性探索フェーズでは、ロボットの初期位置と動作に対する対象物の動き方を予測し、該予測した対象物の動き方が前記知覚ステップにより知覚された対象物の動き方と相違する場合に、新規性を認めて、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習することを特徴とする請求項10に記載のロボットのための学習方法。

【請求項14】新規性が認められた場合には、対象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、

該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習することを特徴とする請求項13に記載のロボットのための学習方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、少なくとも肢体と体幹部を有する脚式ロボットに対する学習システム及び学習方法に係り、特に、肢体及び／又は体幹部を利用した各種の動作パターンを実行する脚式ロボットに対する学習システム及び学習方法に関する。

【0002】更に詳しくは、本発明は、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いて時系列的な学習・教示作用を実現する脚式ロボットに対する学習システム及び学習方法に係り、特に、リカレント・ニューラル・ネットワークによって対象物の動きを予測し、ノベルティ・リワーディングによって所定の対象物を動かすための多様なモーションを自己学習する脚式ロボットに対する学習システム及び学習方法に関する。

【0003】

【従来の技術】電気的若しくは磁気的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置のことを「ロボット」という。ロボットの語源は、スラブ語のROBOTA(奴隷機械)に由来すると言われている。わが国では、ロボットが普及し始めたのは1960年代末からであるが、その多くは、工場における生産作業の自動化・無人化などを目的としたマニピュレータや搬送ロボットなどの産業用ロボット(industrial robot)であった。

【0004】アーム式ロボットのように、ある特定の場所に植設して用いるような据置きタイプのロボットは、部品の組立・選別作業など固定的・局所的な作業空間でのみ活動する。これに対し、移動式のロボットは、作業空間は非限定的であり、所定の経路上または無経路上を自在に移動して、所定の若しくは任意の人的作業を代行したり、ヒトやイヌあるいはその他の生命体に置き換わる種々の幅広いサービスを提供することができる。なかでも脚式の移動ロボットは、クローラ式やタイヤ式のロボットに比し不安定で姿勢制御や歩行制御が難しくなるが、階段や梯子の昇降や障害物の乗り越えや、整地・不整地の区別を問わない柔軟な歩行・走行動作を実現できるという点で優れている。

【0005】最近では、イヌやネコのように4足歩行の動物の身体メカニズムやその動作を模したベット型ロボット、あるいは、ヒトのような2足直立歩行を行う動物の身体メカニズムや動作をモデルにしてデザインされた「人間形」若しくは「人間型」のロボット(humanoid robot)など、脚式移動ロボットに関する研究開発が進展し、実用化への期待も高まってきている。

【0006】ロボットに対して所定動作を教え込むことを、「教示」若しくは「ティーチング」と呼ぶ。動作教

示には、例えば、作業現場においてオペレータ又はユーザが手取り足取り教える教示方式や、計算機などロボット外部のエディタ上で動作パターンを入力・作成・編集を行う教示方式などが挙げられる。

【0007】しかしながら、従来のロボットにおいては、動作教示を行うために、その操作環境を相当程度理解し習熟する必要がある、ユーザの負担が過大であった。

【0008】また、ロボットの動作教示や学習に関する従来の手法では、あらかじめモーション・データとしてロボットに与えられ、その動作を外部の状況に合わせて再生するというプロセスを取るものが一般的であった。この手法によれば、動作再生の安定性が見込まれる反面、新しい動作を生み出すことが困難であることと、予期しない状況には対応することができないという問題がある。

【0009】また、モーションはオフラインで生成されるものであるから、あらかじめ与えたモーションがロボットの形状や現在の作業環境に対して最適であるという保証もない。

【0010】ところで、近年、ロボットの制御にニューラル・ネットワークを適用する事例が紹介されている。

【0011】ニューラル・ネットワークとは、人間の脳における神経回路網を簡略化したモデルであり、神経細胞ニューロンが一方方向にのみ信号を通過するシナプスを介して結合されているネットワークを意味する。ニューロン間の信号の伝達はシナプスを介して行われ、シナプスの抵抗、すなわち重みを適当に調整することによりさまざまな情報処理が可能となる。各ニューロンは、他の1以上のニューロンからの出力をシナプスによる重み付けをして入力し、それら入力値の総和を非線型応答関数の変形を加え、再度他のニューロンへ出力する。

【0012】ニューラル・ネットワークによる制御では、摩擦や粘性などの非線型問題にそのまま対応することができるとともに、学習機能を備えているので、パラメータの設定変更が不要になる。

【0013】しかしながら、ロボットが予期しないような状況に対処した動作を生成するためにためにニューラル・ネットワークを適用した事例は少ない。

【0014】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いて時系列的な学習・教示作用を実現する、脚式ロボットに対する優れた学習システム及び学習方法を提供することにある。

【0015】本発明の更なる目的は、リカレント・ニューラル・ネットワークによって対象物の動きを予測し、ノベルティ・リワーディングによって所定の対象物を動かすための多様なモーションを自己学習することができる、脚式ロボットに対する優れた学習システム及び学習方法を提供することにある。

【0016】本発明の更なる目的は、リカレント・ニューラル・ネットワークによって現在の環境に応じた新しい動作を生み出すことができ、予期しない状況に対処して、多様な表現を可能にする、脚式ロボットのための学習システム及び学習方法を提供することにある。

【0017】

【課題を解決するための手段】本発明は、上記課題を参照してなされたものであり、複数の関節で構成されるロボットのための学習システム又は学習方法であって、作業空間上の対象物を動かすように各関節を駆動してロボットの動作を制御する制御手段又はステップと、作業環境上で発生する事象を検出する知覚手段又はステップと、前記制御手段又はステップにより発現されるロボットの動作と該動作時の対象物の動き方と前記知覚手段又はステップにより知覚した事象をリカレント・ニューラル・ネットワークに学習する学習手段又はステップと、を具備することを特徴とするロボットのための学習システムである。

【0018】ここで、前記学習手段又はステップは、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた予測部又はサブステップと、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた学習部又はサブステップを備え、前記予測部又はサブステップは前記制御手段又はステップにより発現される動作と前記知覚手段又はステップにより知覚される事象を基に次の時刻の事象を予測し、前記学習部又はサブステップは、該予測した事象が前記知覚手段又はステップにおいて次の時刻に現実知覚された事象と相違するときに、ロボットの動作と知覚される事象を学習するようにしてもよい。

【0019】また、前記学習手段又はステップは、対象物の動き方に対する経験をまったく持たない状態の学習フェーズと、ロボットの動作と対象物の動きに関する1又はそれ以上の関係を学習している状態の新規性探索フェーズとを有していてもよい。

【0020】前記学習フェーズでは、対象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習するようにしてもよい。また、ロボットの動作を所定回数だけ試行しても対象物の動き方に再現性を確認できなかった場合には、ロボットの初期位置と動作の組み合わせを変えて、学習作業を再試行するようにしてもよい。

【0021】また、前記新規性探索フェーズでは、ロボットの初期位置と動作に対する対象物の動き方を予測し、該予測した対象物の動き方が前記知覚手段又はステップにより知覚された対象物の動き方と相違する場合に、新規性を認めて、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習するようにしてもよい。

【0022】そして、新規性が認められた場合には、対

象物に対して同様のロボットの動作を所定回数だけ適用して、該ロボットの動作と対象物の動き方に再現性を確認できた場合に、ロボットの初期位置及び動作と対象物の動き方を学習するようにすればよい。

【0023】

【作用】本発明に係るロボットは、カメラを始めとする知覚センサと、学習機構としてのリカレント・ニューラル・ネットワークとを備えている。

【0024】本発明によれば、ロボット自身の持つ制御可能な部分によって外界の移動可能な対象物を動かし、知覚センサによって対象物のおかれている環境と、対象物の動きを知覚して、ロボットの各関節部の動かし方と対象物の動きのとの関連を学習することができる。

【0025】また、対象物の動きを予測して、ノベルティ・リワーディングにより対象物を動かすモーションを自己学習することができる。

【0026】ノベルティ・リワーディングを用いることで、予期できない動きに対してより高い報酬を与えることができ、ロボットのモーションの多様性に無限の可能性を与えることができる。この結果、ユーザは長い間同じロボットを楽しむことができる。

【0027】また、本発明に係る学習メカニズムを搭載したロボットは、環境に応じたモーションの創発が可能となる。したがって、あらかじめロボットに対してモーションのインプットを行う必要がなくなる。また、環境に応じたモーションを生成することができるので、ユーザの環境ごとに多様な動作をするロボットを提供することができる。

【0028】本発明のさらに他の目的、特徴や利点は、後述する本発明の実施例や添付する図面に基づくより詳細な説明によって明らかになるであろう。

【0029】

【発明の実施の形態】以下、図面を参照しながら本発明の実施例を詳解する。

【0030】図1には、本発明を実施に供される、四肢による脚式歩行を行う歩行ロボット1の外観構成を示している。図示の通り、該ロボット1は、四肢を有する動物の形状や構造をモデルにして構成された多関節型の移動ロボットである。とりわけ本実施例の歩行ロボット1は、愛玩動物の代表例であるイヌの形状及び構造を模してデザインされたペット型ロボットという側面を有し、例えば人間の住環境において人間と共存するとともに、ユーザ操作に応答した動作表現を行うことができる。

【0031】歩行ロボット1は、胴体部ユニット2と、頭部ユニット3と、尻尾4と、四肢すなわち脚部ユニット6A～6Dで構成される。

【0032】頭部ユニット3は、ロール、ピッチ及びヨーの各軸方向（図示）の自由度を持つ首関節7を介して、胴体部ユニット2の略前上端に配設されている。また、頭部ユニット3には、イヌの「目」に相当するCC

D (Charge Coupled Device: 電荷結合素子) カメラ 15 と、「耳」に相当するマイクロフォン 16 と、「口」に相当するスピーカ 17 と、触感に相当するタッチセンサ 18 が搭載されている。これら以外にも、生体の五感を構成するセンサを含んでも構わない。

【0033】尻尾 4 は、ロール及びピッチ軸の自由度を持つ尻尾関節 8 を介して、胴体部ユニット 2 の略後上端に湾曲若しくは揺動自在に取り付けられている。

【0034】脚部ユニット 6 A 及び 6 B は前足を構成し、脚部ユニット 6 C 及び 6 D は後足を構成する。各脚部ユニット 6 A ~ 6 D は、それぞれ、大腿部ユニット 9 A ~ 9 D 及び脛部ユニット 10 A ~ 10 D の組み合わせで構成され、胴体部ユニット 2 底面の前後左右の各隅部に取り付けられている。大腿部ユニット 9 A ~ 9 D は、ロール、ピッチ、ヨーの各軸の自由度を持つ股関節 11 A ~ 11 D によって、胴体部ユニット 2 の各々の所定部位に連結されている。また、大腿部ユニット 9 A ~ 9 D と脛部ユニット 10 A ~ 10 D の間は、ロール及びピッチ軸の自由度を持つ膝関節 12 A ~ 12 D によって連結されている。

【0035】なお、歩行ロボット 1 の関節自由度は、実際には各軸毎に配備され関節アクチュエータ (図示しない) の回転駆動によって提供される。また、歩行ロボット 1 が持つ関節自由度の個数や配置は任意であり、本発明の要旨を限定するものではない。

【0036】図 2 には、歩行ロボット 1 の電気・制御システムの構成図を模式的に示している。同図に示すように、歩行ロボット 1 は、全体の動作の統括的制御やその他のデータ処理を行う制御部 20 と、入出力部 40 と、駆動部 50 と、電源部 60 とで構成される。以下、各部について説明する。

【0037】入出力部 40 は、入力部として移動ロボット 1 の目に相当する CCD カメラ 15 や、耳に相当するマイクロフォン 16、触感に相当するタッチセンサ 18 など、五感に相当する各種のセンサを含む。また、出力部として、口に相当するスピーカ 17 などを装備している。これら出力部は、脚部などによる機械運動パターン以外の形式で、歩行ロボット 1 からユーザに対してシンボリックなフィードバックを与えることができる。

【0038】歩行ロボット 1 は、カメラ 15 を含むことで、作業空間上に存在する任意の物体の形状や色彩を認識することができる。また、歩行ロボット 1 は、カメラのような視覚手段の他に、赤外線、音波、超音波、電波などの発信波を受信する受信装置をさらに備えていてもよい。この場合、各伝送波を検知するセンサ出力に基づいて発信源からの位置や向きを計測することができる。

【0039】駆動部 50 は、制御部 20 が指令する所定の運動パターンに従って歩行ロボット 1 の機械運動を実現する機能ブロックであり、首関節 7、尻尾関節 8、股関節 11 A ~ 11 D、膝関節 12 A ~ 12 D などのそれ

ぞれの関節におけるロール、ピッチ、ヨーなど各軸毎に設けられた駆動ユニットで構成される。図示の例では、歩行ロボット 1 は n 個の関節自由度を有し、したがって駆動部 50 は n 個の駆動ユニットで構成される。各駆動ユニットは、所定軸回りの回転動作を行うモータ (関節アクチュエータ) 51 と、モータ 51 の回転位置を検出するエンコーダ (関節角度センサ) 52 と、制御部からの制御指令値とエンコーダ 52 の出力に基づいてモータ 51 の回転位置や回転速度を適応的に制御するドライバ 53 の組み合わせで構成される。

【0040】電源部 60 は、その字義通り、歩行ロボット 1 内の各電気回路等に対して給電を行う機能モジュールである。本実施例に係る歩行ロボット 1 は、バッテリーを用いた自律駆動式であり、電源部 60 は、充電バッテリー 61 と、充電バッテリー 61 の充放電状態を管理する充放電制御部 62 とで構成される。

【0041】充電バッテリー 61 は、例えば、複数本のニッケル・カドミウム電池セルをカートリッジ式にパッケージ化した「バッテリー・バック」の形態で構成される。

【0042】また、充放電制御部 62 は、バッテリー 61 の端子電圧や充電/放電電流量、バッテリー 61 の周囲温度などを測定することでバッテリー 61 の残存容量を把握し、充電の開始時期や終了時期などを決定するようになっている。

【0043】制御部 20 は、ヒトやイヌの「頭脳」に相当し、例えば歩行ロボット 1 の頭部ユニット 3 あるいは胴体部ユニット 2 に搭載される。

【0044】図 3 には、制御部 20 の構成をさらに詳細に図解している。同図に示すように、制御部 20 は、メイン・コントローラとしての CPU (Central Processing Unit) 21 が、メモリその他の各回路コンポーネントや周辺機器とバス接続された構成となっている。バス 27 上の各装置にはそれぞれに固有のアドレス (メモリ・アドレス又は I/O アドレス) が割り当てられており、CPU 21 はアドレス指定することでバス 28 上の特定の装置と通信することができる。

【0045】RAM (Random Access Memory) 22 は、DRAM (Dynamic RAM) などの揮発性メモリで構成された書き込み可能メモリであり、CPU 21 が実行するロボット制御用のプログラム・コードをロードしたり、作業データの一時的な保存のために使用される。

【0046】ROM (Read Only Memory) 23 は、プログラムやデータを恒久的に格納する読み出し専用メモリである。ROM 23 に格納されるプログラム・コードには、歩行ロボット 1 の電源投入時に実行する自己診断テスト・プログラムや、歩行ロボット 1 の動作を規定する制御プログラムなどが挙げられる。

【0047】本実施例では、歩行ロボット 1 の制御プログラムには、リカレント・ニューラル・ネットワークに基づく学習機能が適用されている。リカレント・ニュー

10

20

30

40

50

ラル・ネットワークによれば、時系列的な学習を行うことができる。すなわち、音楽などの時系列的な入力情報と、この音楽に合わせたダンスなどの時系列的な関節角度パラメータとを関連付けた学習を行うことができる。但し、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いた学習機構並びに教示機構の詳細については、後述に譲る。

【0048】不揮発性メモリ24は、例えばEEPROM (Electrically Erasable and Programmable ROM) のように、電氣的に消去再書き込みが可能なメモリ素子で構成され、逐次更新すべきデータを不揮発的に保持するために使用される。逐次更新すべきデータには、例えば、歩行ロボット1の行動パターンを規定する学習モデル、感情モデル、本能モデル、行動計画モデルなどが挙げられる。

【0049】インターフェース25は、制御部20外の機器と相互接続し、データ交換を可能にするための装置である。インターフェース25は、例えば、カメラ15やマイクロフォン16、スピーカ17との間でデータ入出力を行う。また、インターフェース25は、駆動部50内の各ドライバ53-1...との間でデータやコマンドの入出力を行う。また、インターフェース25は、電源部60との間で充電開始及び充電終了信号の授受を行うこともできる。

【0050】インターフェース25は、RS (Recommended Standard) -232Cなどのシリアル・インターフェース、IEEE (Institute of Electrical and electronics Engineers) 1284などのパラレル・インターフェース、USB (Universal Serial Bus) インターフェース、i-Link (IEEE1394) インターフェース、SCSI (Small Computer System Interface) インターフェースなどのような、コンピュータの周辺機器接続用の汎用インターフェースを備え、ローカル接続された外部機器との間でプログラムやデータの移動を行うようにしてもよい。

【0051】また、インターフェース25の1つとして赤外線通信 (IrDA) インターフェースを備え、外部機器と無線通信を行うようにしてもよい。赤外線通信のための送受信部は、例えば頭部ユニット2や尻尾3など、歩行ロボット1本体の先端部に設置されることが受信感度の観点から好ましい。

【0052】さらに、制御部20は、無線通信インターフェース26ネットワーク・インターフェース・カード (NIC) 27を含み、"bluetooth"や、"11B"のような近接無線通信、あるいはLAN (Local Area Network: 例えばEthernet (登録商標)) やインターネットを経由して、外部のホスト・コンピュータ100とデータ通信を行うことができる。

【0053】このような歩行ロボット1とホストコンピュータ間のデータ通信の目的は、遠隔のコンピュータ資

源を用いて歩行ロボット1の動作をリモート・コントロールすることである。また、該データ通信の他の目的は、動作モデルやその他のプログラム・コードなど歩行ロボット1の動作制御に必要なデータやプログラムをネットワーク経由で歩行ロボット1に供給することにある。

【0054】歩行ロボット1の動作制御は、現実には、CPU21において所定のソフトウェア・プログラムを実行することによって実現する。図4には、ロボット1上で稼動するソフトウェア制御構成を模式的に示している。

【0055】同図に示すように、ロボット制御用のソフトウェアは、複数層のソフトウェアで構成される階層構造を備えている。制御用ソフトウェアにはオブジェクト指向プログラミングを採り入れることができる。この場合、各ソフトウェアは、データとそのデータに対する処理手続きとを一体化させた「オブジェクト」というモジュール単位で扱われる。

【0056】最下層のデバイス・ドライバは、各関節アクチュエータの駆動やセンサ出力の受信などハードウェアに対して直接アクセスすることを許容されたオブジェクトであり、ハードウェアからの割り込み要求に応答して該当する処理を行うようになっている。

【0057】仮想ロボットは、各種デバイス・ドライバと所定のオブジェクト間通信プロトコルに基づいて動作するオブジェクトとの仲介となるオブジェクトである。ロボット1を構成する各ハードウェア装置へのアクセスは、この仮想ロボットを介して行われる。

【0058】サービス・マネージャは、コネクション・ファイルに記述されたオブジェクト間の接続情報を基に、各オブジェクトに接続を促すシステム・オブジェクトである。

【0059】システム層より上位のソフトウェアは、オブジェクト (プロセス) 毎にモジュール化されており、必要な機能毎にオブジェクトを選択して置換容易な構成になっている。したがって、コネクション・ファイルを書き換えることで、データ型が一致するオブジェクトの入出力を自由に接続することができる。

【0060】デバイス・ドライバ層とシステム層以外のソフトウェア・モジュールは、ミドルウェア層とアプリケーション層に大別される。

【0061】図5には、ミドルウェア層の内部構成を模式的に図解している。

【0062】ミドルウェア層は、ロボット1の基本的な機能を提供するソフトウェア・モジュールの集まりであり、各モジュールの構成はロボット1の機械的・電氣的な特性や仕様、形状などハードウェア属性の影響を受ける。

【0063】ミドルウェア層は、機能的に、認識系のミドルウェア (図5の左半分) と、出力系のミドルウェア

(図5の右半分)に分けることができる。

【0064】認識系のミドルウェアでは、画像データや音声データ、その他のセンサから得られる検出データなど、ハードウェアからの生データを仮想ロボット経由で受け取ってこれら処理する。すなわち、各種入力情報に基づき、音声認識、距離検出、姿勢検出、接触、動き検出、色認識などの処理を行い、認識結果を得る(例えば、ボールを検出した、転倒を検出した、撫でられた、叩かれた、ドミソの音階が聞こえた、動く物体を検出した、障害物を検出した、障害物を認識した、など)。認識結果は、入力セマンティクス・コンバータを介して上位のアプリケーション層に通知され、行動計画などに利用される。

【0065】一方、出力系のミドルウェアでは、歩行、動きの再生、出力音の合成、目に相当するLEDの点灯制御などの機能を提供する。すなわち、アプリケーション層において立案された行動計画を出力セマンティクス・コンバータを介して受信処理して、ロボット1の各機能毎にロボットの各ジョイントのサーボ指令値や出力音、出力光(LED)、出力音声などを生成して、出力すなわち仮想ロボットを介してロボット1上で実演する。このような仕組みにより、より抽象的な行動コマンド(例えば、前進、後退、喜ぶ、吼える、寝る、体操する、驚く、トラッキングするなど)を与えることで、ロボット1の各関節による動作を制御することができる。

【0066】また、図6には、アプリケーション層の内部構成を模式的に図解している。

【0067】アプリケーションは、入力セマンティクス・コンバータ経由で受け取った認識結果を使って、ロボット1の行動計画を決定して、出力セマンティクス・コンバータ経由で決定された行動を返すようになっている。

【0068】アプリケーションは、ロボット1の感情をモデル化した感情モデルと、本能をモデル化した本能モデルと、外部事象とロボット1がとる行動との因果関係を逐次記憶していく学習モジュールと、行動パターンをモデル化した行動モデルと、行動モデルによって決定された行動の出力先を切り替える行動切替部とで構成される。

【0069】入力セマンティクス・コンバータ経由で入力される認識結果は、感情モデル、本能モデル、行動モデルに入力されるとともに、学習モジュールには学習教示信号として入力される。

【0070】行動モデルによって決定されたロボット1の行動は、行動切替部並びに出力セマンティクス・コンバータ経由でミドルウェアに送信され、ロボット1上で実行される。あるいは、行動切替部を介して、行動履歴として感情モデル、本能モデル、学習モジュールに、行動履歴として供給される。

【0071】感情モデルと本能モデルは、それぞれ認識

結果と行動履歴を入力に持ち、感情値と本能値を管理している。行動モデルは、これら感情値と本能値を参照することができる。また、学習モジュールは、学習教示信号に基づいて行動選択確率を更新して、更新内容を行動モデルに供給する。

【0072】本実施例に係る学習モジュールは、音楽データのような時系列データと、関節角度パラメータとを関連付けて、時系列データとして学習することができる。時系列データの学習のために、リカレント・ニューラル・ネットワークを採用する。リカレント・ニューラル・ネットワークは、内部にフィードバック結合を備えることで、1周期前の情報をネットワーク内に持ち、これによって時系列データの履歴を把握することができる仕組みになっている。

【0073】図7には、リカレント型のニューラル・ネットワークの構成例を模式的に図解している。同図に示すように、このネットワークは、入力データが入力されるユニット群である入力層と、ネットワークの出力を出すユニット群である出力層と、それら以外のユニット群である中間層で構成される。

【0074】リカレント・ニューラル・ネットワークでは、各ユニットにおける過去の出力がネットワーク内の他のユニット(あるいは自分自身)に戻されるような結合関係が許容される。したがって、時間に依存して各ニューロンの状態が変化するような動的性質をネットワーク内に含めることができ、時系列パターンの認識や予測を行うことができる。

【0075】図7に示す例では、リカレント・ニューラル・ネットワークは、所定数の入力層のニューロンを有している。各ニューロンには、センサの状態に相当する $s_i$ と、モータすなわち関節アクチュエータの状態に相当する $m_i$ が入力されている。また、入力層のニューロンの出力は、中間層のニューロンを介して、出力層のニューロンに供給されている。

【0076】出力層のニューロンからは、リカレント・ニューラル・ネットワークのセンサの状態に対応する出力 $S_{t+1}$ が出力される。また、出力の一部は、コンテキスト $C_t$ として、入力層のニューロンにフィードバックされている。

【0077】図示のリカレント・ニューラル・ネットワークを用いた学習は、出力されたセンサの予測値 $S_{t+1}$ と、実際に次の時刻で計測されたセンサの値 $s_{t+1}$ との誤差に基づいて、バック・プロパゲーション法により実行される。このような学習機構により、入力されたセンサとモータと時系列データに対して、次のセンサ情報を予測することが可能になる。

【0078】図8には、リカレント・ニューラル・ネットワークのインバース・ダイナミクスを示している。これは、時刻 $t$ におけるセンサ予測出力とコンテキスト $C_t$ を与えて、時刻 $t-1$ のセンサ入力とモータの状態入



力、コンテキスト $C_{t-1}$ を得るネットワーク構造である。

【0079】インバース・ダイナミクスによる学習は、図7に示したフォワード・ダイナミクスの出力を入力として、その出力結果とフォワード・ダイナミクスへの入力との誤差を使って、同様にバック・プロパゲーション法により実現する。したがって、図7に示したフォワード・ダイナミクスによる学習と同時に、図8に示すインバース・ダイナミクスによる学習を行なうことができる。

【0080】このインバース・リカレント・ニューラル・ネットワークを用いて、得られたセンサ入力とコンテキストを順次入力にフィードバックしていくことで、時間を遡ってモータの状態を順に得ることができる。最終的に、時刻 $t$ のセンサ出力 $s_t$ を得るためのモータの時系列 $m_1, m_2, \dots, m_{t-1}$ を得ることができる。

【0081】図7に示すフォワード・ダイナミクスと図8に示すインバース・ダイナミクスとを組み合わせ、さらにロボット制御用ソフトウェア（図4を参照のこと）の枠組みに従ってモジュール化することにより、ロボットの学習機構を実現するリカレント・ニューラル・ネットワーク（RNN）モジュールを構築することができる。図9には、このRNNモジュールの構成を図解している。また、図10には、RNNモジュールを搭載したロボット制御用ソフトウェアの構成を図解している。

【0082】行動計画モジュールは、外部事象や感情モデル、本能モデル等に基づいてロボット1がとるべき行動計画を立案し、コマンドすなわち各モータ（関節アクチュエータ）に対する制御指示 $m_t$ を発行するとともに、RNNモジュールにもコマンド $m_t$ を入力する。

【0083】姿勢管理モジュールは、コマンド $m_t$ に従って、仮想ロボットを介して、トラッキング、モーション再生、転倒復帰、歩行などの該当する動作を実現する。

【0084】また、画像や音声、その他のセンサから得られる検出データは、仮想ロボット経由で認識系のミドルウェア（前述）において処理され、それぞれの特徴量が抽出される。これらセンサ特徴量 $S_t$ はRNNモジュールに入力される。

【0085】RNNモジュールは、学習フェーズでは、コマンド $m_t$ とセンサ特徴量 $S_t$ という2つの入力を用いて、フォワード・モデル及びインバース・モデルの学習を行う。

【0086】行動計画モジュールは、RNNモジュールのフォワード・ダイナミクスからの出力として、次の時刻におけるセンサの予測値 $S_{t+1}$ とコンテキスト $C_{t+1}$ を観測することができる。学習フェーズでは、行動計画モジュールは、自らの行動計画に基づいて、ロボット1の行動を決定する。

【0087】これに対し、RNNモジュールによりロボ

ット1の学習がある程度進行した状態では、行動計画モジュールは、RNNモジュールによるセンサ予測値 $S_{t+1}$ とコンテキスト $C_{t+1}$ を必要に応じて内部状態に関連付けて記憶する、という作業を行う。

【0088】そして、行動計画モジュールの内部に記憶されたセンサ値とコンテキストを想起させる必要が発生したときには、行動計画モジュールは、想起させたいセンサ値 $S$ とコンテキスト $C$ を取り出して、RNNモジュールのインバース・モデルに対してこれを与える。これに対し、RNNモジュールでは、これらセンサ値 $S$ 及びコンテキスト $C$ の入力を実現するアクションの時系列を、インバース・ダイナミクス（図8を参照のこと）を用いて順次計算し、この計算結果を姿勢管理モジュールに送信する。この結果、行動計画モジュールが期待する入力が得られるように、ロボット1が行動を行うようになる。

【0089】本実施例に係るロボットは、上述したように、カメラを始めとする知覚センサと、学習機構としてのリカレント・ニューラル・ネットワークを備えている。そして、ロボット自身の持つ制御可能な部分によって外界の移動可能な対象物を動かし、知覚センサによって対象物のおかれている環境と、対象物の動きを知覚して、ロボットの各関節部の動かし方と対象物の動きのとの関連を学習するようになっている。また、対象物の動きを予測して、ノベルティ・リワーディングにより対象物を動かすモーションを自己学習することができる。

【0090】ノベルティ・リワーディングとは、要するにセンサ予測値がセンサの実測値とかけ離れているほど高い報酬を与えるように報酬の誤差を設定して学習を行う方式である。

【0091】図10に示したRNNモジュールのうち、インバースRNNによる学習を行う代わりに、図11に示すようにリカレント・ニューラル・ネットワークの入力に対する報酬を出力するようなRNNモジュールを用意する。

【0092】各関節アクチュエータへのコマンド $m_t$ と、各部からのセンサ出力値（例えばカメラからの入力画像） $S_t$ が入力として与えられ、センサの予測値（例えば、次の場面でのカメラの入力画像の予測） $S_{t+1}$ が出力される。センサ予測値は、センサ実測値と比較され、両者の差が大きいほど大きくなる報酬 $R_{t+1}$ が得られ、次の関節アクチュエータのコマンドに影響を与える。また、出力の一部は、コンテキストとして、コンテキスト・ループによりフィードバックされる。

【0093】図11に示すようなRNNモジュールの出力の評価は、同時に出力されたセンサ予測値がセンサの実測値とかけ離れているほど高い報酬を与えるように報酬の誤差を設定して学習を行う。したがって、このRNNモジュールにとって不測の事態が起きるような行動を取ると、高い報酬を得ることができる。

【0094】図12には、ノベルティ・リワーディングを採り入れたRNNモジュールの構成例を図解している。図示のような構成によれば、リカレント・ニューラル・ネットワークによる学習が進んだ状態で、行動計画モジュールが幾つかの行動の候補をRNNモジュールに与えると、このような行動を与えた結果の報酬を予測して、モータ動作選択部では報酬が最も大きくなるようなモータ動作すなわち行動計画を選ぶことができる。

【0095】したがって、ノベルティ・リワーディング機構をリカレント・ニューラル・ネットワークに採り入れることにより、ロボット1は今までに経験したことのない行動や外界の状態（センサ入力）を選ぶことができ、この結果、ロボット1の行動範囲が拡大する。

【0096】図13には、ノベルティ・リワーディングを採り入れたロボット1の動作制御システムの構成うち、特にモーションの創発と学習に関連する部分を中心に図解している。

【0097】ロボット1は、身体すなわち各関節アクチュエータを自由に制御することができ、目の前の対象物を含む環境情報を入力するための視覚センサと、外部事象と動作との因果関係を学習するとともに、予期しない状況に対処した動作を生成するための機構を備えている。図示の通り、該制御システムでは、学習並びに予期しない状況への対処のために、予測機構と学習機構を備えている。予測機構と学習機構は、いずれも図7に示すようなリカレント・ニューラル・ネットワークで構成される。

【0098】予測機構は、各関節アクチュエータごとに配置された関節角度センサからの関節角度データと、カメラなどの視覚センサから得られた画像データとをそれぞれ入力して、作業環境における次のシーン、すなわち次の時刻における画像データをフォワード・ダイナミクスにより予測して、後段の比較器に出力する。

【0099】比較器は、図11に示すようなノベルティ・リワーディング機構で構成されており、予測機構から出力される予測された次の時刻の画像データと、視覚センサによって得られた次の時刻における実際の画像データを、それぞれ入力して比較を行う。

【0100】そして、比較器は、視覚センサの予測値が視覚センサの実測値とかけ離れているほど高い報酬を与えるように報酬の誤差を設定して、次の各関節アクチュエータの動かし方すなわち行動計画を学習機構に出力する。

【0101】学習機構は、関節角度センサからの関節角度データ、ならびに、視覚センサからの画像データを入力して、フォワード・ダイナミクスにより、比較器が出力する報酬に従って自己学習を行う。

【0102】本実施例に係るロボット1は、作業環境内にある適当な対象物を選択して、その対象物に対して、ロボット1の動作と対象物の動かし方の学習を始めるよ

うになっている。

【0103】このようなロボット1の動作段階は、ある対象物に対してまったく経験を持たない状態の「学習フェーズ」と、ロボット1の動作と対象物の動きに関する1つ又はそれ以上の関係を既に学習している状態の「新規性探索フェーズ」に区分される。

【0104】図14には、ロボット1が動作段階を切り替えるための手順をフローチャートの形式で図解している。

10 【0105】ロボット1が目前にある対象物（例えばボール）を発見し、その動かし方を学習するという場面が、作業途上で発生したとする（ステップS1）。

【0106】このような場合、まず、その対象物の動かし方を既に学習したことがあるか否かを判別する（ステップS2）。そして、既に学習していれば、新規性探索フェーズに遷移し（ステップS3）、未だ学習したことがなければ、学習フェーズに遷移する（ステップS4）。

20 【0107】図15には、歩行ロボット1が、対象物としてのボールの動かし方を初めて学習するとき、すなわち学習フェーズにおける動作の様子を図解している。

【0108】（1）ロボット1は、初めての対象物に遭遇すると、与えられたパラメータ、若しくは得られた画像データに基づいて、ロボット1自身と対象物との位置関係を把握して、対象物に接触する可能性の高いパラメータによって各脚部を駆動して、対象物を動かしてみ

る。

【0109】（2）対象物に接触した結果、対象物が動いた場合、何度か同様の動作を繰り返して、対象物の動き方に再現性があるか否かを検証する。例えば、対象物がボールである場合には、同じような蹴り方を数回繰り返すことにより、同じ方向に安定して転がるという現象を導出することができる。

30 【0110】（3）他方、対象物の動き方に再現性を見出せなかった場合、例えば数回ボールを繰り返し蹴っても安定して転がらない場合には、最初のステージに戻って、対象物への接触並びに動かし方を変更してみる。例えば、対象物に対するロボット1の初期位置、ロボット1の動作パターンの組み合わせ方を変更して、再度対象物を動かしてみる。

【0111】（4）対象物の初期位置とロボット1の動作、それによって得られる対象物の動き方に対して再現性を確認することができた場合には、ロボット1は、その初期位置、ロボット1の動作、対象物の動き方の組み合わせを学習データとして記憶する。

【0112】上述したような学習フェーズにおいては、ロボット1は、未知の対象物に対して1つ目の動かし方を学習することができる訳である。

50 【0113】また、図16には、ロボット1が初期状態と対象物の一連の動き方を認識するための、視覚センサ

によって得られる画像の例を示している。

【0114】ロボット1と対象物の初期相対位置情報は、ロボット1の動作前の状態で撮像された画像データを基に得ることができる。

【0115】また、ロボット1の動作後すなわち動作により対象物が動いた結果は、ロボット1の動作後の状態で撮像された画像データを基に得ることができる。

【0116】これらロボット1の動作前後における各画像データを、リカレント・ニューラル・ネットワークの入力データとすることで、計算コストを軽減するとともに、画像データのうち対象物以外の部分によって得られる環境情報も同時にニューラル・ネットワークの学習データとして入力することができる。この結果、RNNモジュールは、対象物の動きと環境の様子を学習することができる。

【0117】リカレント・ニューラル・ネットワークは、コンテキスト・ループを特徴とするニューラル・ネットワークであり、時系列事象の学習を行うことができる（前述、並びに図7を参照のこと）。

【0118】本実施例では、学習フェーズにおいて、ロボット1の動作前の画像データと各関節アクチュエータの動きパラメータをリカレント・ニューラル・ネットワークへの入力とし、ロボットの動作後に得られる画像データを教示データとする。このようなリカレント・ニューラル・ネットワークにより学習がなされていれば、ロボット1は、動作前の画像データを得ることによって、例えばボールの蹴り方などの対象物に印加する動作を1つ決めることで、対象物のその後の動き方を予測することができる。

【0119】上述したような学習フェーズを経て、ロボット1がある対象物に関する1以上の動かし方を学習した後、ロボット1は新規性探索フェーズに移移する。図17には、新規性探索フェーズにおける動作手順をフローチャートの形式で示している。以下、このフローチャートに従って、新規性探索フェーズについて説明する。

【0120】ロボット1は、既に1回以上の学習がなされている。ここでは、ノベルティ・リワーディングに基づき対象物を動かしてみる（ステップS11）。すなわち、RNNモジュールが返す報酬Rが大きくなりそうな動作を選択して、そのパラメータに従って各関節アクチュエータを駆動して、対象物を動かしてみる。

【0121】次いで、各関節アクチュエータを駆動させた結果、対象物に接触してこれを動かすことができたか否かをチェックする（ステップS12）。

【0122】対象物に接触していなかったり、あるいは対象物に十分な力を印加することができず、動かすことができなかった場合には、ステップS11に戻り、制御パラメータを変更して試行を繰り返す。

【0123】他方、対象物を動かすことができたならば、ロボット1の脚部など各関節アクチュエータの制御

パラメータや、対象物を撮像した画像データを基に、リカレント・ニューラル・ネットワークによって対象物の動きを予測し（ステップS13）、さらに、予測される動き方と現実に観察される対象物の動きとを比較する（ステップS14）。

【0124】対象物がリカレント・ニューラル・ネットワークによる予測に近い動きをした場合、新規性が低いと判断して、ロボット1は、ステップS11に戻り、制御パラメータを変更して違う動き方を試行する。

【0125】他方、対象物が予測とは大きく相違する動きをした場合には、ロボット1は、さらに数回同様の動きを繰り返して、その動きに再現性があるか否かを検証する（ステップS15）。

【0126】そして、再現性があると確認された場合には、その結果をリカレント・ニューラル・ネットワークに学習する（ステップS16）。

【0127】図18には、2回目以降すなわち新規性探索フェーズにおいて、歩行ロボット1が対象物としてのボールを動かし方と対象物の動きを学習する様子を図解している。

【0128】（1）ロボット1は、既に知っているボールなどの対象物に遭遇すると、対象物に対して既に学習した動かし方を適用して、RNNモジュールが返す報酬Rを予測して、報酬の大きな行動を選択して、その場合における対象物の動きを予測する。

【0129】（2）同様の動かし方を数回繰り返して適用して、予測した通りに対象物が動くかどうかを検証する。

【0130】（3）数回繰り返して対象物を動かしてみても、予測通りに動く場合には、最初のステージに戻って、対象物への接触並びに動かし方を変更して、より高い報酬が得られるように新規性探索を行う。

【0131】（4）同様の動かし方を数回繰り返して適用しても、予測した通りに対象物が動かない場合には、新規性があると判断して、その動かし方と対象物の動き方を、リカレント・ニューラル・ネットワークに学習する。

【0132】なお、図15や図18に示す例では、対象物をボールのような球形を用いて説明したが、本発明の要旨はこれに限定されない。例えば、図19に例示するように、立方体、三角柱、三角錐、円錐、円柱、あるいはその他の多面体など、さまざまな形状の対象物に対しても、上述したような本実施例に係るノベルティ・リワーディングを利用したリカレント・ニューラル・ネットワークによる学習を適用することができる。

【0133】また、ロボット1や対象物が設置される床面が図20に示すように区々である場合や、その他、ロボット1の作業環境が異なる場合であっても、同様に、上述したノベルティ・リワーディングを利用したリカレント・ニューラル・ネットワークによる学習を適用する

10

20

30

40

50

ことができることも理解されたい。

【0134】[追補]以上、特定の実施例を参照しながら、本発明について詳解してきた。しかしながら、本発明の要旨を逸脱しない範囲で当業者が該実施例の修正や代用を成し得ることは自明である。

【0135】本発明の要旨は、必ずしも「ロボット」と称される製品には限定されない。すなわち、電氣的若しくは磁氣的な作用を用いて人間の動作に似せた運動を行う機械装置であるならば、例えば玩具等のような他の産業分野に属する製品であっても、同様に本発明を適用することができる。

【0136】要するに、例示という形態で本発明を開示してきたのであり、限定的に解釈されるべきではない。本発明の要旨を判断するためには、冒頭に記載した特許請求の範囲の欄を参酌すべきである。

【0137】

【発明の効果】以上詳記したように、本発明によれば、リカレント・ニューラル・ネットワークを用いて時系列的な学習・教示作用を実現する、脚式ロボットに対する優れた学習システム及び学習方法を提供することができる。

【0138】また、本発明によれば、リカレント・ニューラル・ネットワークによって対象物の動きを予測し、ノベルティ・リワーディングによって所定の対象物を動かすための多様なモーションを自己学習することができる。脚式ロボットに対する優れた学習システム及び学習方法を提供することができる。

【0139】また、本発明によれば、リカレント・ニューラル・ネットワークによって現在の環境に応じた新しい動作を生み出すことができ、予期しない状況に対処し、多様な表現を可能にする、脚式ロボットのための学習システム及び学習方法を提供することができる。

【0140】本発明によれば、ロボットは、モーションの創発と学習によって、現在置かれている環境に応じた新しい動作を生み出すことができ、多様な表現を可能にする。この結果、ロボットの環境適応能力や行動範囲が拡大し、動作による表現の多様性を確保することができる。

【0141】また、本発明によれば、ロボットのモーションの多様性に無限の可能性を与えることができる結果として、ユーザを長い間楽しませることができる。

【0142】また、本発明によれば、環境に応じたモーションの創発が可能となるので、あらかじめロボットに対してモーションのインプットを行う必要がなくなる。また、環境に適応したモーションを生成することができるので、各ユーザの環境毎に多様な動作をするロボットを実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明を実施に供される、四肢による脚式歩行を行う歩行ロボット1の外観構成を示した図である。

【図2】脚式歩行ロボット1の電気・制御系統の構成図を模式的に示した図である。

【図3】制御部20の構成をさらに詳細に示した図である。

【図4】ロボット1上で稼動するソフトウェア制御構成を模式的に示した図である。

【図5】ミドルウェア層の内部構成を模式的に示した図である。

【図6】アプリケーション層の内部構成を模式的に示した図である。

【図7】リカレント型のニューラル・ネットワーク（フォワード・ダイナミクス）の構成例を模式的に示した図である。

【図8】リカレント・ニューラル・ネットワークのインバース・ダイナミクスを示した図である。

【図9】ロボット制御用ソフトウェアの枠組みに従ってモジュール化されたRNNモジュールの構成を示した図である。

【図10】図10に示すRNNモジュールを搭載したロボット制御用ソフトウェアの構成を示した図である。

【図11】ノベルティ・リワーディングの仕組みを模式的に示した図である。

【図12】ノベルティ・リワーディングを採り入れたRNNモジュールの構成例を示した図である。

【図13】ノベルティ・リワーディングを採り入れたロボットの動作制御システムの構成を模式的に示した図である。

【図14】ロボット1が動作段階を切り替えるための手順を示したフローチャートである。

【図15】歩行ロボット1が、対象物としてのボールの動かし方を初めて学習する一連の動作（すなわち学習フェーズにおける動作の様子）を描写した図である。

【図16】ロボット1が初期状態と対象物の一連の動き方を認識するための、視覚センサによって得られる画像の例を示した図である。

【図17】新規性探索フェーズにおける動作手順を示したフローチャートである。

【図18】歩行ロボット1が、新規性探索フェーズにおける対象物としてのボールの動かし方を描写した図である。

【図19】ロボットや対象物が設置される環境の相違を例示した図である。

【図20】ロボットや対象物が設置される環境の相違を例示した図である。

【符号の説明】

1…歩行ロボット

2…胴体部ユニット

3…頭部ユニット

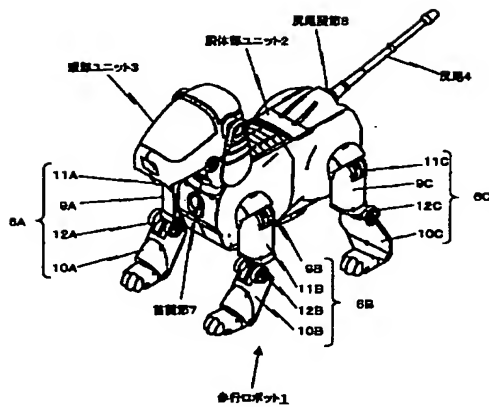
4…尻尾

6A～6D…脚部ユニット

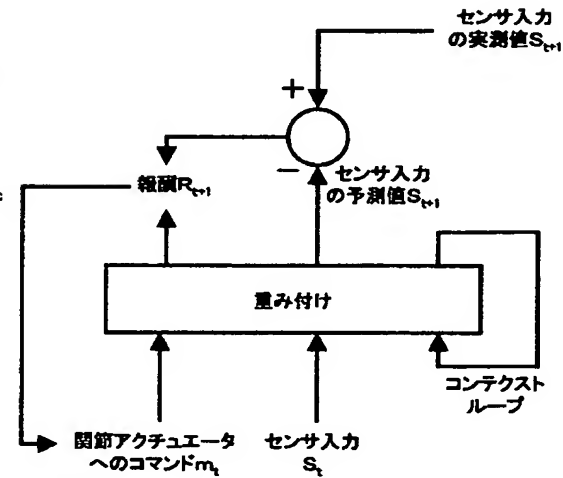
7…首関節  
 8…尻尾関節  
 9A～9D…大腿部ユニット  
 10A～10D…脛部ユニット  
 11A～11D…股関節  
 12A～12D…膝関節  
 15…CCDカメラ  
 16…マイクロホン  
 17…スピーカ  
 18…タッチセンサ  
 20…制御部  
 21…CPU  
 22…RAM  
 23…ROM

\* 24…不揮発メモリ  
 25…インターフェース  
 26…無線通信インターフェース  
 27…ネットワーク・インターフェース・カード  
 28…バス  
 29…キーボード  
 40…入出力部  
 50…駆動部  
 51…モータ（関節アクチュエータ）  
 52…エンコーダ（関節角度センサ）  
 53…ドライバ  
 60…電源部  
 61…充電バッテリー  
 \* 02…充放電制御部

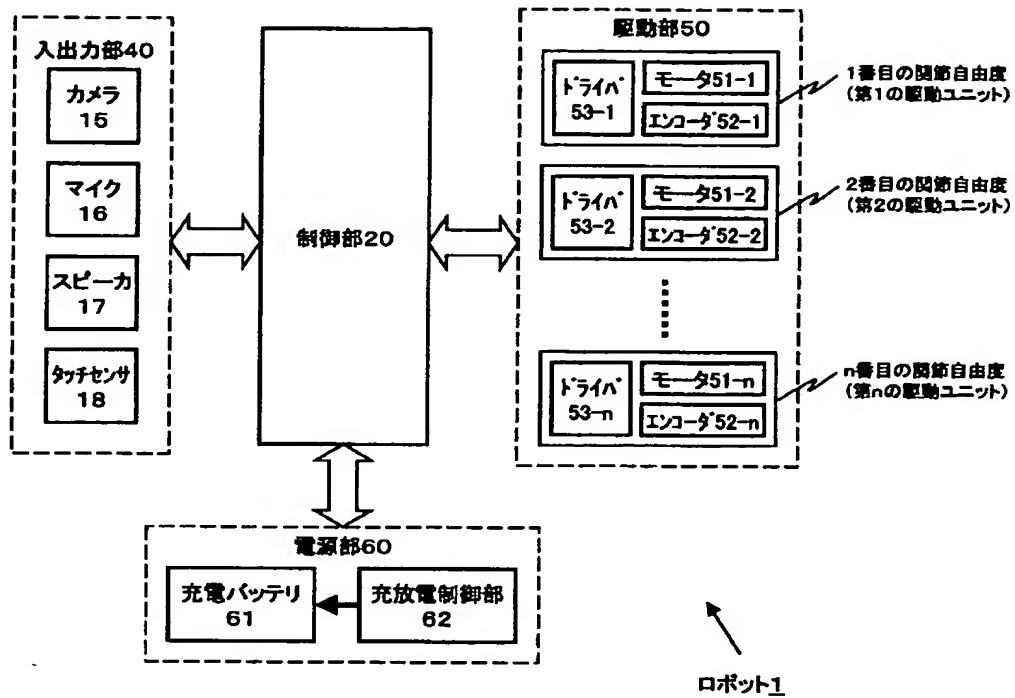
【図1】



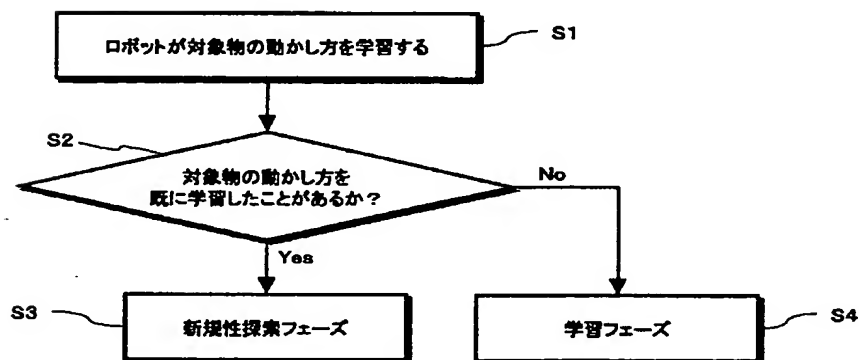
【図11】



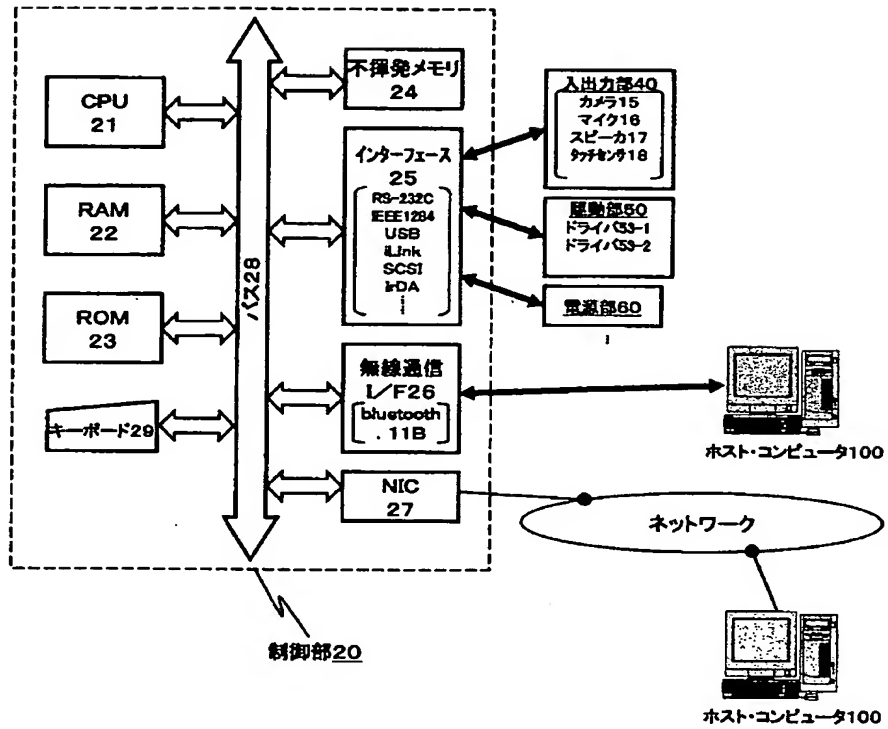
【図2】



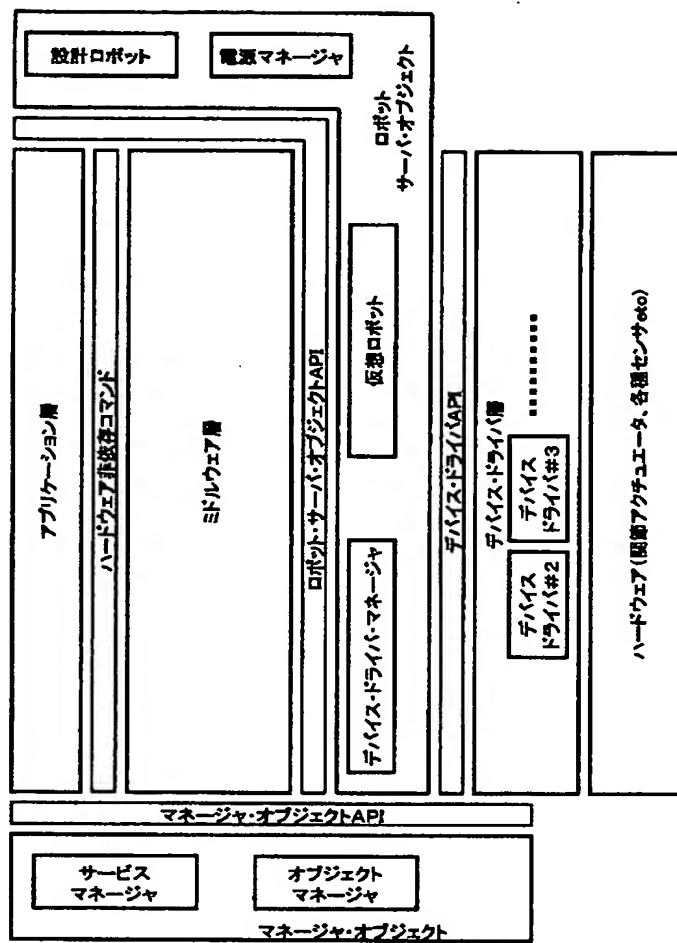
【図14】



【図3】

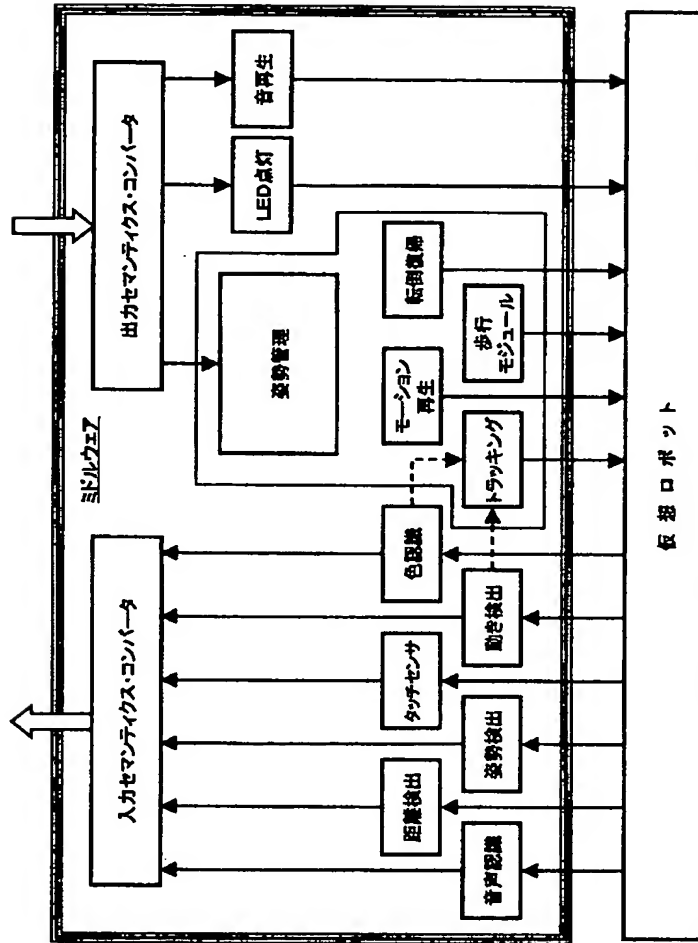


【図4】

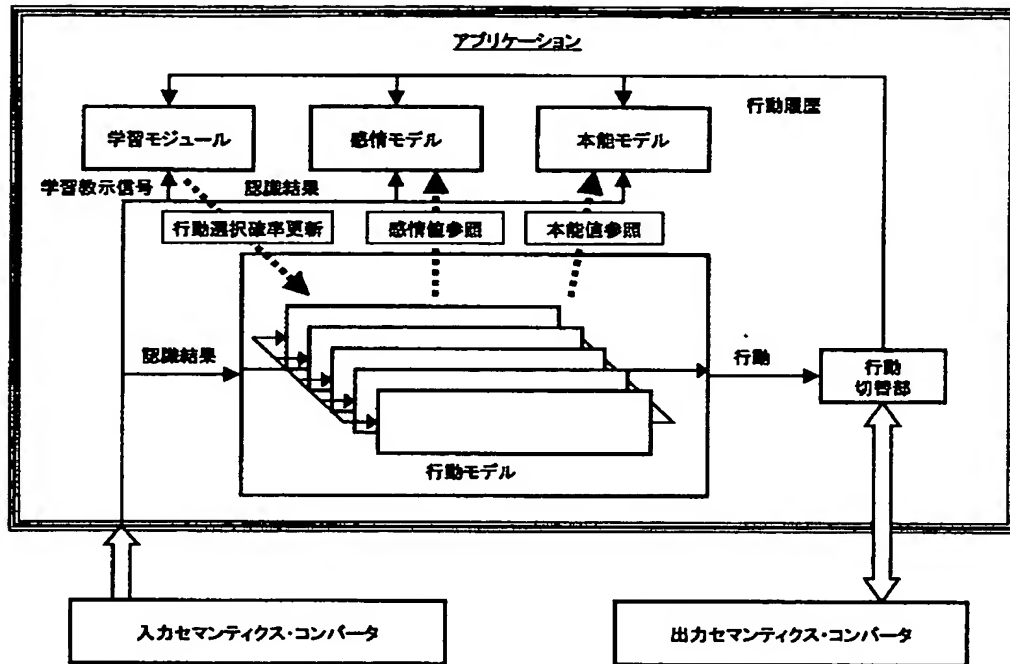




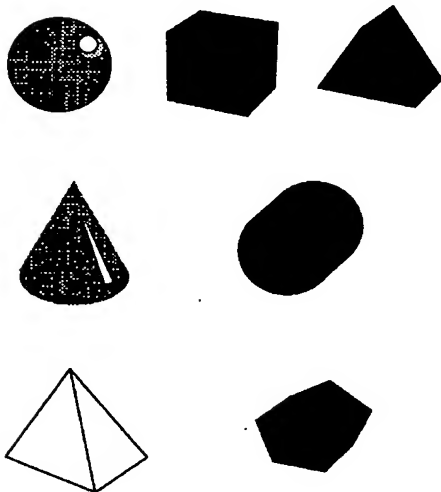
【図5】



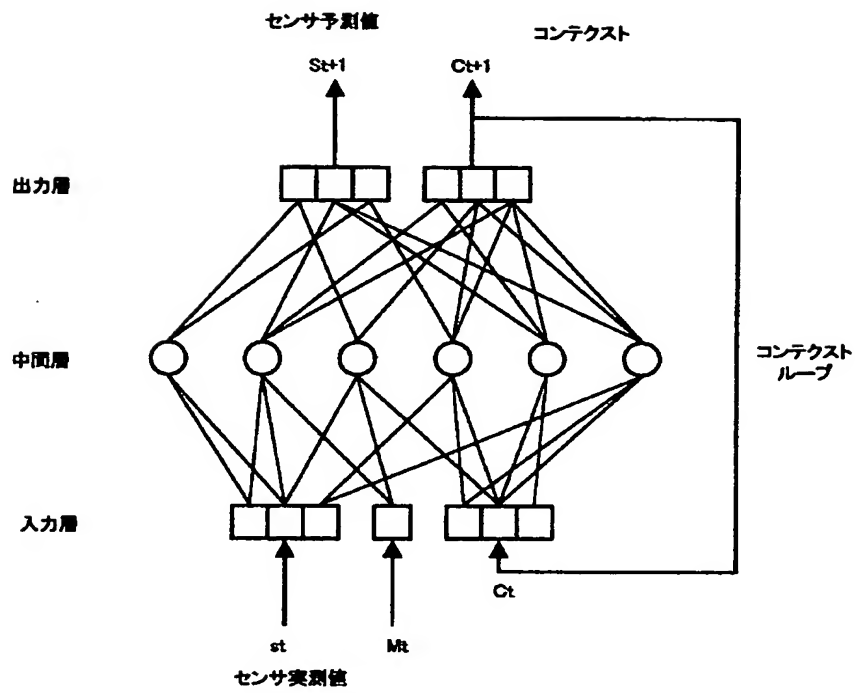
【図6】



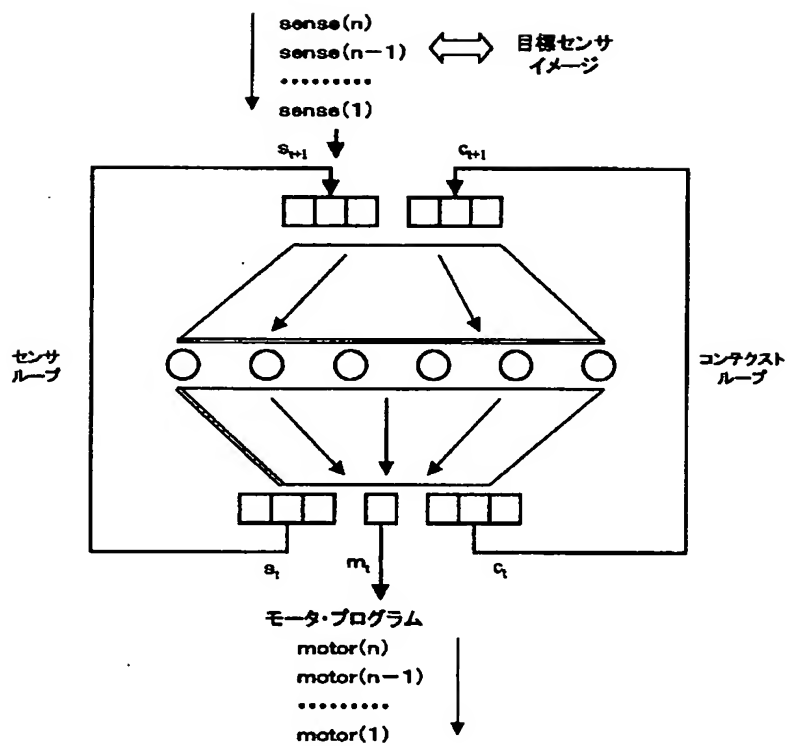
【図19】



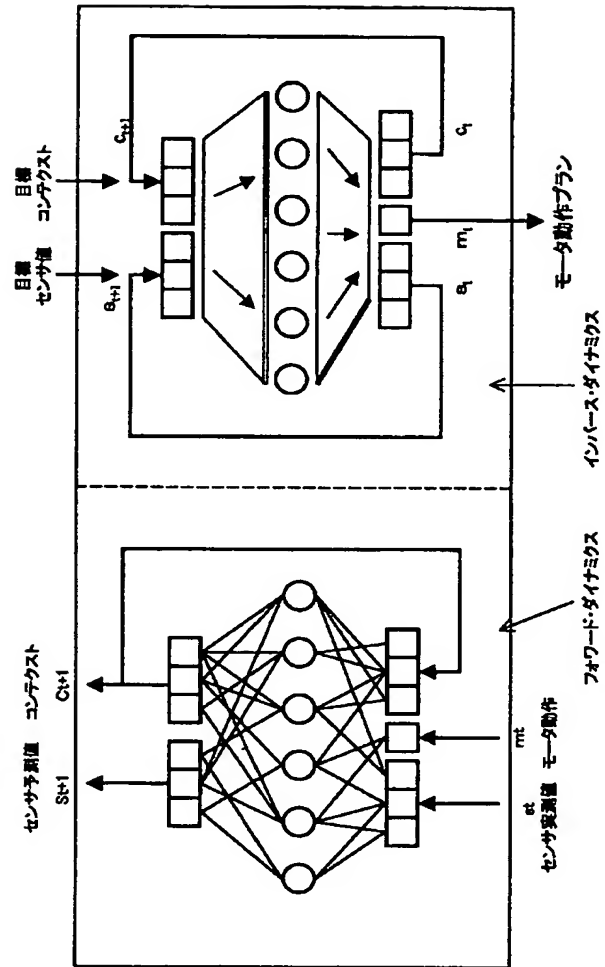
【図7】



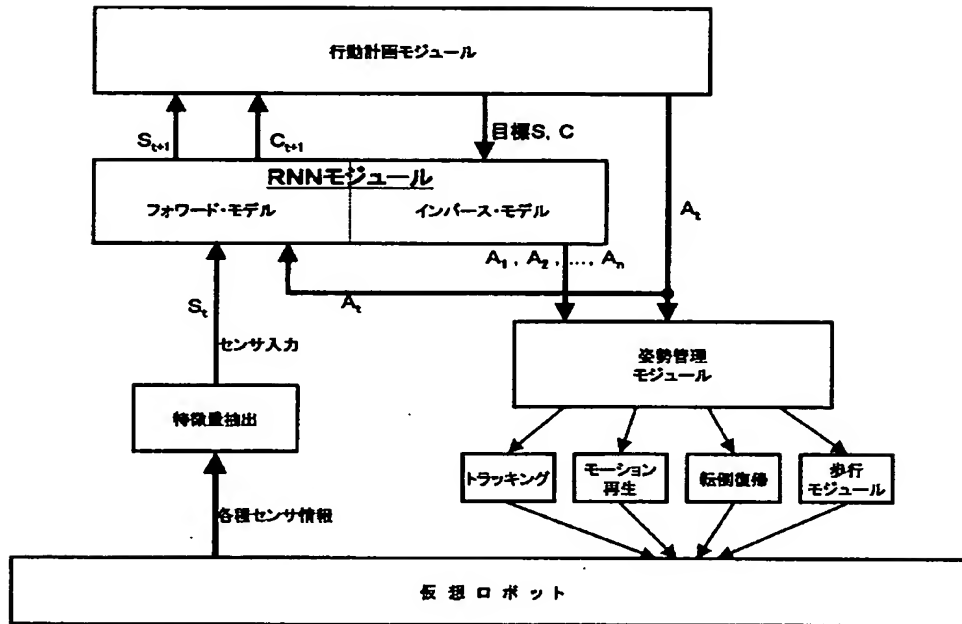
【図8】



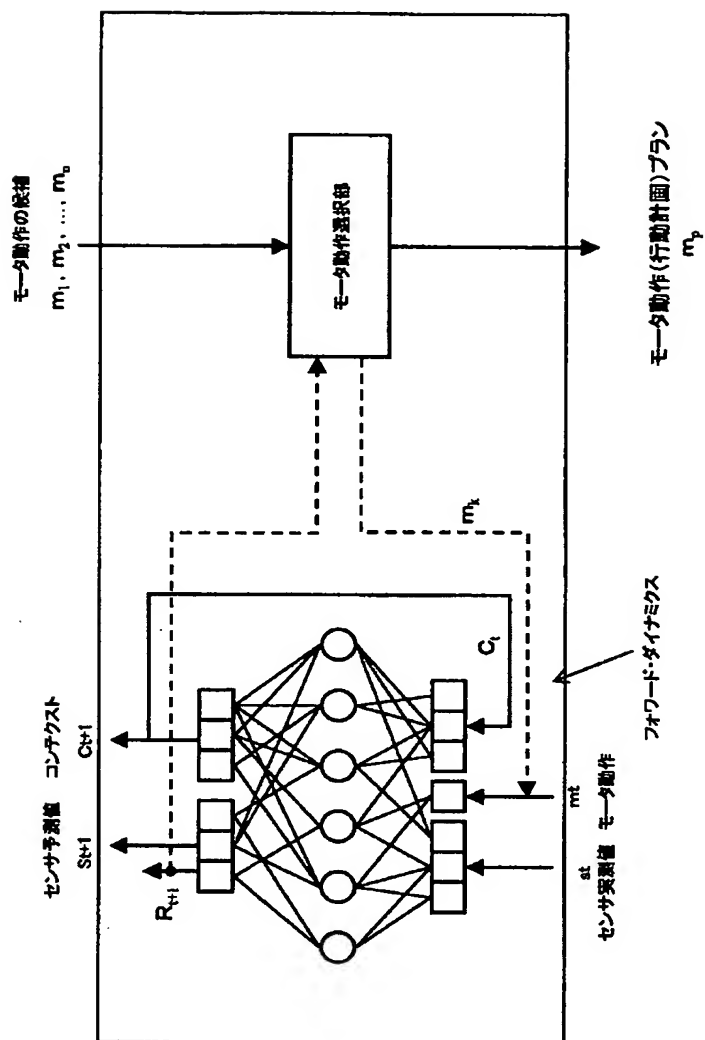
【図9】



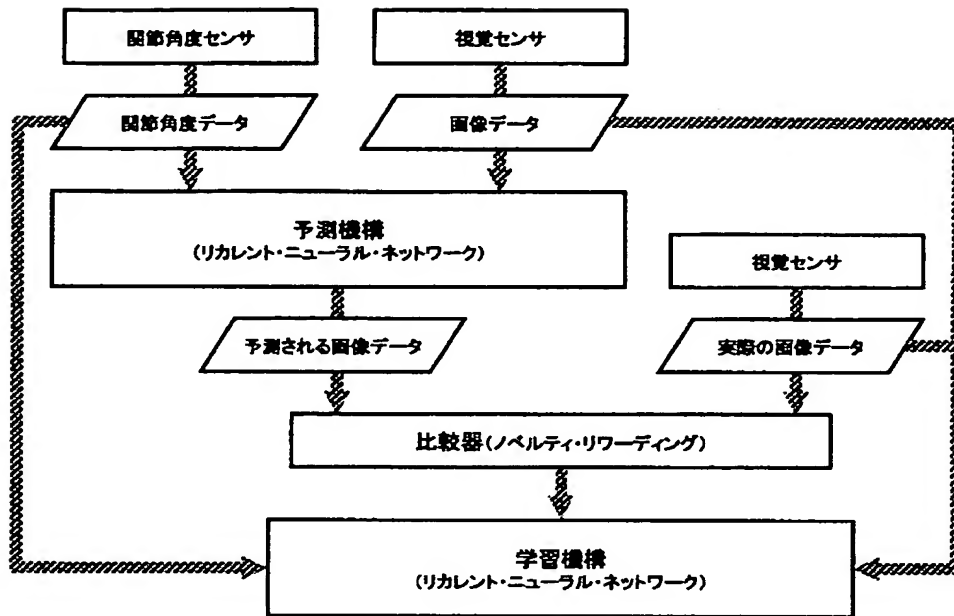
【図10】



【図12】

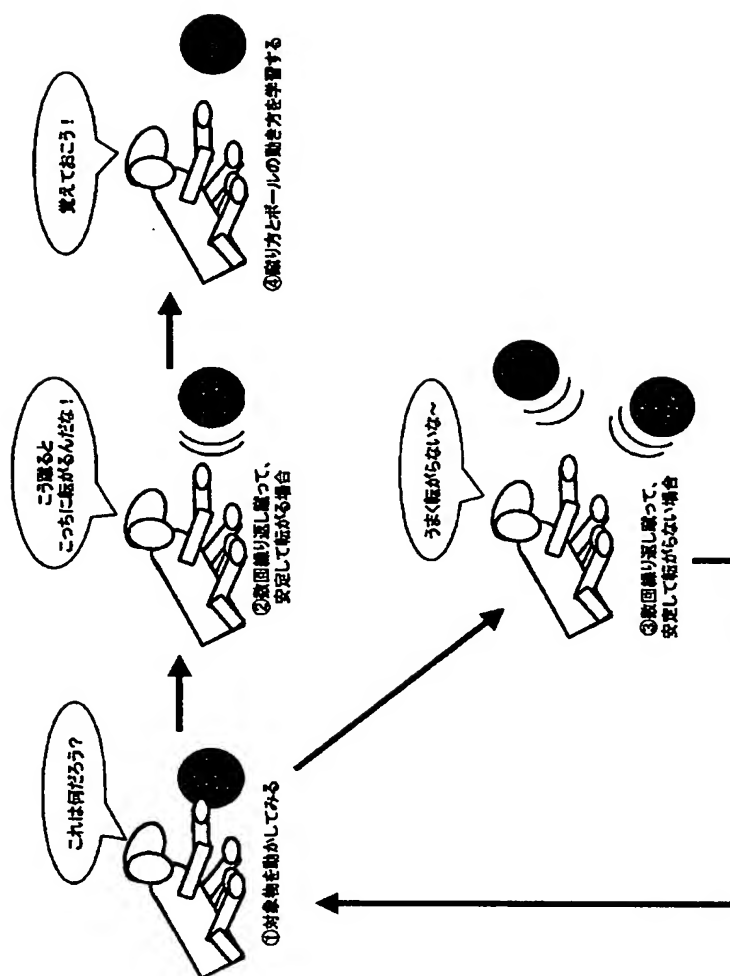


【図13】

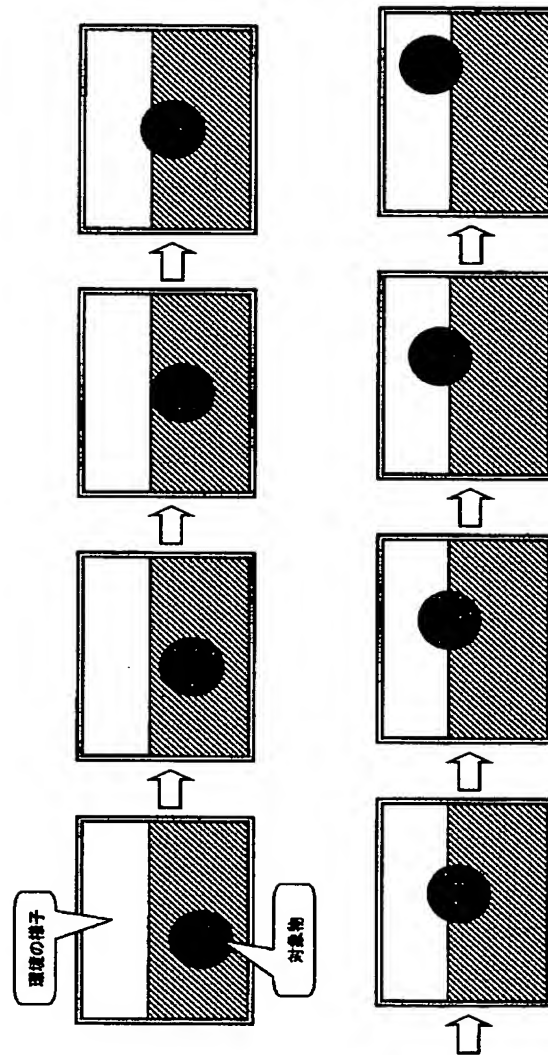




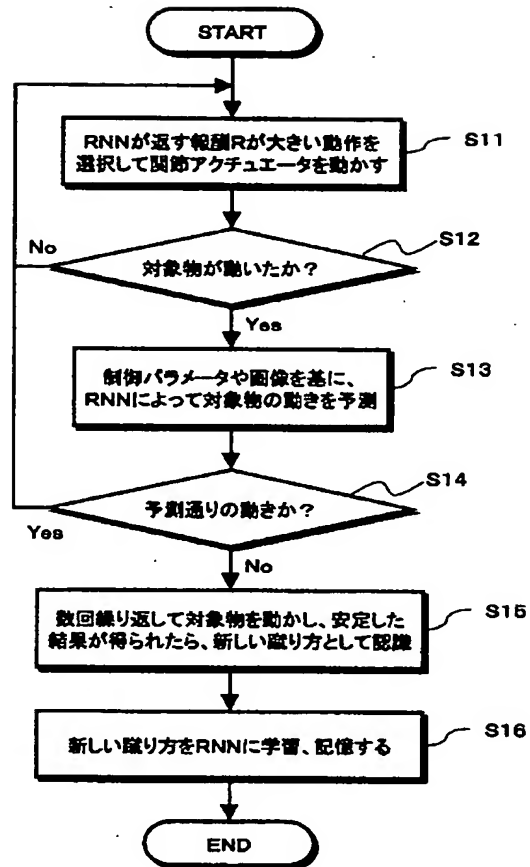
【図15】



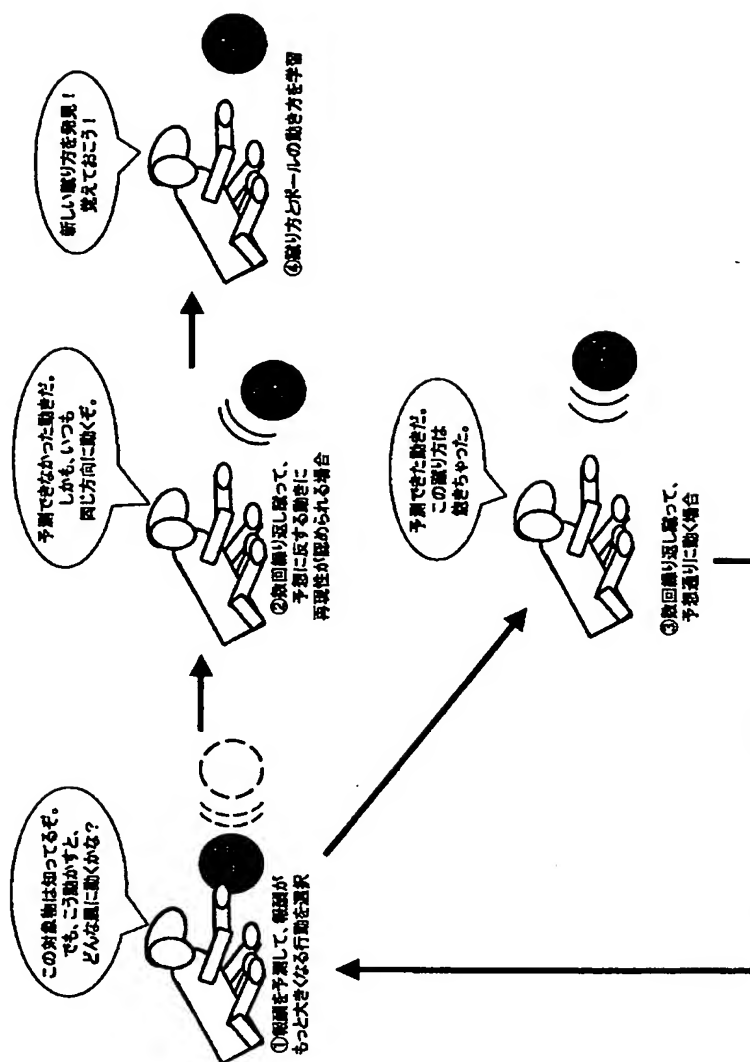
【図16】



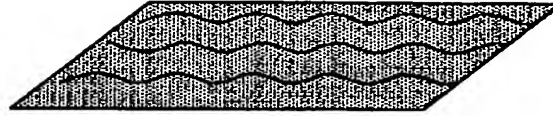
【図17】



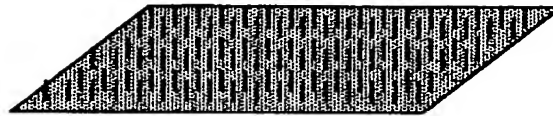
【図18】



【図20】



起伏のある床面



絨毯など、毛が生えた床面



毛並みに流れのある床面

---

フロントページの続き

(72)発明者 伊藤 真人  
東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ  
ー株式会社内  
(72)発明者 横野 順  
東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニ  
ー株式会社内

Fターム(参考) 3F059 AA00 BA02 BB06 BC07 BC09  
CA05 CA06 DA02 DA05 DA08  
DB02 DB09 DD01 DD06 FA03  
FA05 FA08 FA10 FC07 FC14  
FC15  
3F060 AA00 CA14 CA26 GA05 GA13  
HA02